

微流控芯片脱模缺陷分析及其脱模装置研究^{*}

蒋炳炎 翟瞻宇 申瑞霞 邱庆军

(中南大学机电工程学院现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要 为减小微流控芯片的脱模缺陷, 设计了 4 种顶杆式脱模方案。采用有限元法模拟了 4 种脱模方案下微流控芯片的脱模过程。模拟结果显示, 顶杆的数目和位置对微流控芯片的脱模应力具有重要影响, 采用第 1 种脱模方案时, 微流控芯片的最大脱模应力达到 123 MPa, 超过了微流控芯片所用聚甲基丙烯酸甲酯的强度极限 110 MPa, 微流控芯片在脱模后发生断裂; 其它 3 种脱模方案下微流控芯片均能顺利脱出, 且脱模应力均小于强度极限。为了克服顶杆脱模方式下芯片易出现表面质量差的缺陷, 设计了一种新型的气动脱模装置, 并通过有限元法模拟了微流控芯片在此装置下脱模应力的分布, 证实了该装置的有效性及其优越性。

关键词 注射成型 脱模 应力 有限元

微流控芯片集样品制备、进样、反应、分离、检测等于一体, 具有高效性、微型化、集约化、自动化等特点, 在 DNA 分析、基因表达分析、疾病诊断、药物筛选、免疫学测定等方面有着广泛的应用前景, 对人类生活与健康将产生深远影响^[1-3]。注射成型技术以批量化、高精度、低成本等优势逐渐成为生产微流控芯片的主要方法之一^[4-5], 开辟了批量制造一次性微流控芯片的道路, 使微流控芯片商品化、家庭化成为可能。

脱模作为注射成型过程的一个重要阶段, 担负着将制件与型腔顺利脱离的任务^[6-7]。如果脱模系统设计不合理会导致制件应力集中、变形等缺陷^[8-9]。与常规制件相比, 微流控芯片壁薄、结构特征尺寸小等特点给传统的脱模机构带来了巨大的挑战。A. M. Dieudonne 等均采用顶杆实现微流控芯片的脱模, 但脱模质量不高^[10-11]。脱模系统中顶杆的数目、分布及顶杆的面积是影响脱模质量的重要因素, 尽管顶杆越多, 制件的受力面积越均匀, 但是较多的顶杆会影响制件的表面光洁度。一个较为合理的脱模系统不仅能提高制件的质量, 而且能够节省空间, 提高制件的生产效率。

相对于微流控芯片注射成型充填方面的研究成果来说, 关于其脱模方面的研究还十分缺乏。笔者采用有限元法模拟了微流控芯片的动态脱模过程, 分析了产生脱模缺陷的原因, 详细比较了不同脱模方案下微流控芯片脱模应力的分布和演变规律。同时, 为了克服顶杆脱模方式造成芯片表面质量较差的问题, 设计了一种新型的气动脱模装置, 并通过有限元法模拟研究采用此气动脱模装置时微流控芯片的应力分布情况。

1 脱模过程的有限元模型

在脱模过程中, 由于聚合物与模具间热膨胀系数的差异, 冷却到脱模温度时相互之间出现了较大的热应力, 聚合物由于冷却收缩对型芯产生较大的包紧力。在本有限元数值模拟过程中, 首先计算微流控芯片热-结构耦合下的热应力, 然后对微流控芯片施加脱模位移以模拟芯片的整个动态脱模过程。脱模温度均设定为 80℃, 储液池的直径为 4 mm, 微流控芯片的厚度为 1 mm。

1.1 边界条件

微流控芯片脱模过程有限元分析的边界条件为: 约束模具底面全部自由度, 限制其全部位移; 将型芯与型芯成型孔面处定义为面面接触; 微流控芯片开始脱模时, 选择芯片底面事先做出的顶杆面, 并对其施加 1 mm 的脱模位移。

1.2 材料性能

选用 Ni 作为模具材料, 微流控芯片材料选用台湾奇美实业公司生产的 CM-205 型聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 其玻璃化转变温度约为 100℃, 强度极限为 110 MPa。Ni、PMMA 的性能见表 1。在脱模阶段可将 PMMA 视为弹性材料, Ni、PMMA 间的等效摩擦系数约为 0.4^[12-13]。

表 1 PMMA、Ni 的性能

材料	密度 / kg · m ⁻³	热膨胀系数 / K ⁻¹	拉伸弹性模量 / GPa	泊松比
PMMA	1 190	5.50 × 10 ⁻⁵	2.74	0.355
Ni	8 880	1.31 × 10 ⁻⁵	207	0.310

2 脱模过程的模拟分析

影响制件脱模应力分布的主要因素有脱模系统

^{*} 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA04Z351)

收稿日期: 2009-10-18

的设计、脱模温度、模具与聚合物之间热膨胀系数的差异等。根据微流控芯片的质量要求及顶杆脱模方式的设计经验,本着脱模过程中制件受力均匀、变形量小及脱模过程连续的原则,设计了4种不同的顶杆脱模方案,具体见图1,其中顶杆均设在微流控芯片检测区域以外。

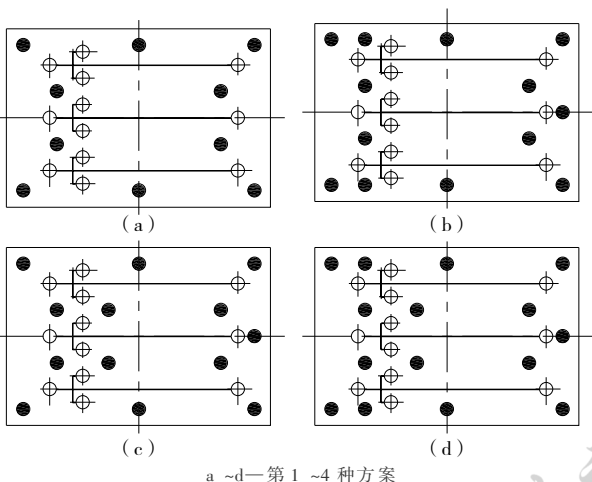


图1 4种脱模方案顶杆布置示意图

基于有限元法对以上4种脱模方案下微流控芯片的脱模过程分别进行数值模拟,结果见图2。由图2可知,第1种脱模方案下,微流控芯片在脱模过程中的最大应力达到123 MPa,超过材料的强度极限,表明该方案将导致微流控芯片在脱模后出现断裂。分析该方案不同脱模阶段微流控芯片的应力分布云图(图3)可知,由于该方案中顶杆位置及数目设计不合理,导致图3a中标出的椭圆部分在脱模过程中由于局部脱模力不足而出现该区域脱出滞后,从而产生较大滞后变形。此变形继续发展造成微流控芯片与型芯小圆柱的咬合,从而使该处应力不断增加,直至断裂。为了验证有限元模型及边界条件的有效性,对第1种方案下微流控芯片的脱模进行试验对比,结果见图4。由图4可以看出,微流控芯片A区域出现断裂现象,表明该有限元模型具有可信性。

为解决第1种脱模方案造成微流控芯片出现的局部脱模力不足问题,在方案1中出现局部脱模力不均的区域增加顶杆的数目,合理布置顶杆位置,设计了另外3种脱模方案。图2表明,这3种方案下微流控芯片的脱模应力随脱模位移不同而动态变化,在脱模初始阶段随着脱模位移的增加,微流控芯片脱模应力近乎呈线性增加趋势,相对位移为0.8 mm时脱模应力开始减小,直至脱出。3种脱模方案

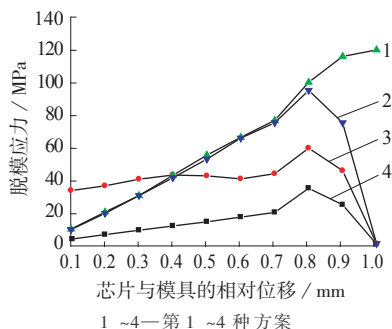
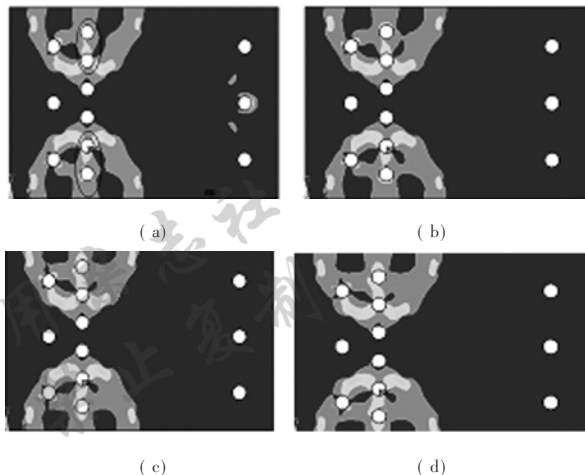


图2 不同脱模方案对微流控芯片脱模应力分布的影响



芯片与模具的相对位移分别为:a—0.2 mm; b—0.6 mm;
c—0.8 mm; d—1.0 mm

图3 第1种脱模方案不同阶段微流控芯片脱模应力分布云

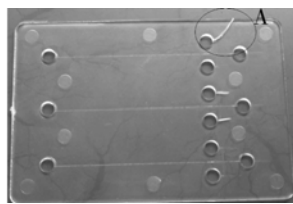
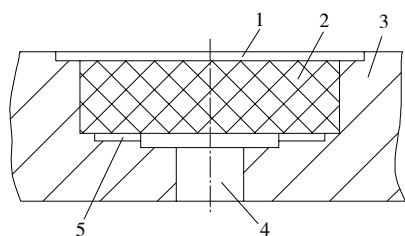


图4 第1种方案脱模断裂缺陷

下微流控芯片的最大脱模应力分别为95、59.3、34.5 MPa,均不超过PMMA的强度极限。相比第1种方案,最大脱模应力降幅分别为29.5%、107%、256%。方案2、方案3均采用13根顶杆,但由于第3种方案中脱模力分布均匀,使得该方案的最大脱模应力比第2种方案降低35.7 MPa。方案4中微流控芯片的脱模应力最小,能够保证制件顺利从模具中脱出。但由于其使用15根顶杆,过多的顶杆容易在芯片的表面留下疤痕,降低了微流控芯片表面的光洁度。显然,采用方案3作为脱模方案最佳。以上分析表明,选择合适的顶杆数目,合理布置顶杆的位置可以显著提高制件的脱模质量,降低微流控芯片的脱模应力。

3 气动脱模装置的设计

目前,微流控芯片注射成型常采用顶杆直接推顶制件的方法脱模,只有合理布置足够的顶杆才能提供足够、均布的脱模力。但是随着顶杆数目的增多,势必会影响制件的表面质量,为了克服常规脱模方式导致的芯片表面质量差、翘曲等缺陷问题,笔者设计了一种新型的气动脱模装置,见图5。其工作原理为:将多孔材料作为气动脱模介质,通过通气孔注入气体,气体通过多孔材料推动微流控芯片与模具分离。由于流体的等压性,可以确保脱模时微流控芯片受到均匀的压力,不会发生采用顶杆脱模时芯片出现的断裂现象。



1—成型面; 2—多孔材料; 3—动模板; 4—通气孔; 5—径向沟槽
图5 气动脱模装置

笔者采用日本新东公司生产的透气钢(平均孔径为 $7\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $0.557\ \mu\text{m}$) 作为气动脱模介质,采用有限元法对该方案下微流控芯片的脱模过程进行了有限元模拟分析,图6示出其脱模应力分布图。由图6可知,此时微流控芯片的最大脱模应力较顶杆脱模时显著降低,为 $20\ \text{MPa}$ 。试验发现,该气动脱模装置可以消除芯片表面的疤痕。

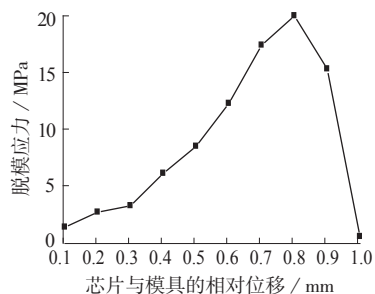


图6 气动脱模装置下微流控芯片的脱模应力分布

4 结论

采用有限元法对微流控芯片的脱模过程进行了

数值模拟,分析了不同脱模方案下微流控芯片脱模应力的演变及分布规律。通过合理布置顶杆位置及采取适当的顶杆数目,可以显著提高微流控芯片的脱模质量,降低脱模应力。有限元模拟分析表明,采用多孔材料为脱模介质的气动脱模装置可显著降低制件的脱模应力,提高制件的表面质量。

参考文献

- [1] 方肇伦. 微流控分析芯片[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Khandurina J, Guttman A. Bioanalysis in microfluidic devices[J]. Journal of Chromatography, 2002, 943(2): 159-183.
- [3] 王晓东. 微流控芯片的制作及其自动化[J]. 高技术通讯, 2004, 14(7): 45-48.
- [4] Huang C K. Polymeric nanofeatures of 100 nm using injection moulding for replication[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(8): 1518-1526.
- [5] Pouzada A S, Ferreira E C, Pontes A J. Friction properties of moulding thermoplastics[J]. Polymer Testing, 2006, 25(8): 1007-1023.
- [6] Griffiths C A, Dimov S S, Brousseau E B, et al. Investigation of surface treatment effects in micro-injection-moulding[EB/OL]. <http://www.springerlink.com/content/k41545k16g486812>. 2009-03-17.
- [7] Pontes A J, Pouzada A S. Ejection force in tubular injection moldings. part 1: effect of processing conditions[J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 44(5): 891-897.
- [8] Bhagavatula N, Michalski D, Lilly B, et al. Modelling and verification of ejection forces in thermoplastic injection moulding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(3): S239-S254.
- [9] Bataineh O M, Klamecki B E. Prediction of local part-mold and ejection force in injection molding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(3): 598-604.
- [10] Dieudonne A M, Emil G, Albert P P, et al. Injection molded microfluidic chips featuring integrated interconnects[J]. Lab on a Chip, 2006, 6(10): 1346-1354.
- [11] 杨芯苹. 应用于微流体元件之微射出成型研究[D]. 台湾: 国立成功大学, 2003.
- [12] Zhang Peng, Liu Gang, Tian Yangchao, et al. The properties of demoulding of Ni and Ni-PTFE moulding inserts[J]. Sensors Actuators A, 2005, 118(2): 338-341.
- [13] 贺永, 傅建中, 陈子辰. 微热压成型脱模缺陷分析及其脱模装置的研究[J]. 机械工程学报, 2008, 39(2): 1-6.

RESEARCH ON DEMOLDING DEFECTS AND DESIGN OF DEMOLDING DEVICE FOR MICROFLUIDIC CHIP

Jiang Bingyan, Zhai Zhanyu, Shen Ruixia, Qiu Qingjun

(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT In an effort to find the proper demolding mechanism and reduce demolding defects, four demolding mechanisms

with ejector pins were designed and the demolding process of microfluidic chip for each of the four mechanisms was simulated using finite element method. The simulation results showed that the number and location of ejector pins had significant influence on the demolding stress of microfluidic chip. In the first demolding mechanism, the maximum demolding stress reached up to 123 MPa, exceeding the strength limit of 110 MPa of PMMA, and rupture in microfluidic chip was observed after demolding. For the other three mechanisms, the microfluidic chip was successfully demolded with demolding stress smaller than the strength limit. A new pneumatic demolding device was designed in view of demolding problems such as poor surface quality and warpage caused by traditional demolding mechanisms. Demolding stress distribution of microfluidic chip was simulated using finite element method and the results verified the effectiveness and superiority of the proposed demolding device.

KEYWORDS injection molding, demolding, stress, finite element

电线电缆行业产品结构调整方向

(1) 核电站电缆市场前景看好

我国“十一五”规划和2020年电力发展的基本方针是深化体制改革,加强电网建设,大力发展可再生能源,优化发展水电,积极发展核电,因地制宜发展天然气发电,积极发展新能源发电,贯彻发展低碳经济,重视生态环境保护,加大技术改造力度,提高能源效率。按照其规划,到2020年将实现27~40个1000兆瓦核电机组,核电比重将从目前的1.8%上升到4%,甚至提高到7%~8%。

目前,电线电缆行业中部分企业已开始生产1E级K3类电缆,但仅有江苏上上电缆等少数企业完成K1类电缆的开发,目前,核岛内电缆还需大量进口。

(2) 海底电缆需求量不断增长

随着目前全球石油、天然气能源日益紧张,由陆地的开采开始大规模地转向海洋领域,海洋石油、天然气工程项目规模不断扩大,需要从陆地向海上石油平台、平台与平台之间进行电力、通讯的传输及技术数据的反馈、控制,使综合海底电缆的需求量在不断增长。根据我国石油发展规划,我国海洋石油开发将迎来一个高速发展期,今后5年将有1200亿元投资于海洋石油开发。

预计2010~2020年间,石油平台的增加速度将保持在8%~10%。我国石油平台的数量2008年约为250台,每个既有石油平台每年需要维修用的海底综合电缆约10 km。而每个新建石油平台所需要的海底综合电缆的用量约为40 km。除石油平台需要大量采用海底综合电缆外,我国对岛屿的开发利用对海底综合电缆的需求也不断增加,再加上海上风力发电工程项目对海底综合电缆的需求,综合测算岛屿开发和海上风力发电对海底综合电缆的年需求数量约为300 km。

据测算,2010年我国海底综合电缆的供需缺口在3000 km左右。而我国目前能生产海底综合电缆的企业仅有青岛汉缆、宁波东方、中天科技、上海电缆、湖北红旗电缆等少数企业,年产能约为3500~4000 km。

(3) 石油平台电缆供需缺口较大

石油平台电缆的需求数量与石油平台的建设数量有直接关系,每座海上石油平台上电缆用量为:自升式平台150 km,半潜式平台180 km,采油平台200 km,生产平台200

km,生活平台100 km。2008年我国新建、维修海上石油平台需要各类电缆10000 km,2009年将达到近16000 km。预计到2020年将超过25000 km。

目前我国石油平台电缆已基本实现国产化,国内企业年产能约为8000~10000 km。按照目前国内产能和需求增长比例测算,预计到2010年前供需缺口在5000 km左右,2020年供需缺口将达到约10000 km。

(4) 现代交通电线电缆应重点关注

为应对经济危机,扩大内需,我国政府巨资金投入基础设施建设。其中,高速铁路、城市轨道交通、现代汽车、舰船和大型飞机等是今后我国重点发展的项目。这些现代交通工具制造需要大量电力、控制、信号和仪表电缆,如机车车辆用线,机车车辆用信号屏蔽电缆、计算机和电工仪器用电线,城市轨道交通直流电力电缆,汽车低压电线,飞机用线和舰船用无卤低烟阻燃电缆等。

(5) 环保电缆应用已成国际趋势

北京、上海等重点城市已明确规定:重要建筑禁止使用聚氯乙烯电线电缆,以避免火灾发生时大量浓烟、氯气造成更多人员伤亡,采用无卤低烟交联聚烯烃绝缘电线电缆已成为这些地区的地方法规,随着环保意识的增加,这类线的应用会逐步扩大。

随着欧盟颁布RoHS指令,生态环保电线电缆的研发和大规模采用已成为国际趋势。目前国内外阻燃、防火电缆应用已扩大到很多领域,如矿用、通用橡套电缆、电梯电缆、家用电器用线缆均有不同程度阻燃要求。

(6) 特种导线供不应求

特种导线采购具有单张订单大、交货期紧的特点,一个较大工程的采购量可达数万吨。目前国内特种导线生产企业的产能均较小,以铝合金导线为例,生产企业主要有青岛汉缆、上海中天铝线、武汉电缆股份公司和杭州中策电缆等为数不多的几家,各家企业年产能仅约5000~10000 t,供货期无法满足工程要求,致使很多工程不得不改用普通导线或进口。据统计,去年我国架空导线的年用量约为120万~150万 t,其中特种导线占5%~10%。“十二五”期间,预计输电线路以13%~15%的速度增长,特种导线占架空导线的比例约为5%~10%。因此,我国特种导线的生产能力还需大力提高。

(慧聪)